



TITLE:

## 研究室紹介

AUTHOR(S):

---

CITATION:

研究室紹介. Cue 2007, 17: 31-49

ISSUE DATE:

2007-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/57909>

RIGHT:

## 研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(※は「新設研究室紹介」、☆は「大学の研究・動向」(特に☆☆は高校生対象に執筆)のページに掲載)

## 電気関係研究室一覧

### 工学研究科

#### 電気工学専攻

##### 複合システム論講座

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野 (島崎研)

##### 電磁工学講座 超伝導工学分野

電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野 (小林研)

電気エネルギー工学講座 電力変換制御工学分野 (引原研)

電気システム論講座 電気回路網学分野 (和田研)

電気システム論講座 自動制御工学分野 (萩原研)

電気システム論講座 電力システム分野 (大澤研) ☆

#### 電子工学専攻

集積機能工学講座 (鈴木研)

電子物理学講座 極微真空電子工学分野 (石川研)

電子物理学講座 プラズマ物性工学分野 (橋研)

電子物性工学講座 半導体物性工学分野

電子物性工学講座 電子材料物性工学分野 (松重研)

量子機能工学講座 光材料物性工学分野

量子機能工学講座 光子電子工学分野 (野田研)

量子機能工学講座 量子電磁工学分野 (北野研) ☆☆

#### 附属イオン工学実験施設

高機能材料工学講座 クラスタイオン工学分野 (高岡研)

### 情報学研究科 (大学院)

#### 知能情報学専攻

知能メディア講座 言語メディア分野 (黒橋研)

知能メディア講座 画像メディア分野 (松山研)

#### 通信情報システム専攻

通信システム工学講座 デジタル通信分野 (吉田研)

通信システム工学講座 伝送メディア分野 (森広研)

通信システム工学講座 知的通信網分野 (高橋研)

集積システム工学講座 情報回路方式分野 (中村研)

集積システム工学講座 大規模集積回路分野 (小野寺研)

集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (佐藤研)

#### システム科学専攻

システム情報論講座 画像情報システム分野

システム情報論講座 医用工学分野 (松田研)

### エネルギー科学研究科 (大学院)

#### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野

#### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (近藤研)

#### エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座 エネルギー応用基礎学分野 (野澤研)

応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野

### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野 (吉川研)

エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野 (水内研)

エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野 (佐野研)

### 生存圏研究所

診断統御研究系 レーダー大気圏科学分野 (深尾研)

診断統御研究系 大気圏精測診断分野 (津田研)

開発創成研究系 宇宙圏電波科学分野 (山川研) \*

開発創成研究系 生存科学計算機実験分野 (大村研)

開発創成研究系 生存圏電波応用分野 (橋本研) ☆

### 京都大学ベンチャービジネスラボラトリー(KU-VBL)

### 国際融合創造センター

#### 融合部門

ベンチャー分野 §

#### 創造部門

先進電子材料分野 (藤田研)

### 高等教育研究開発推進センター

情報可視化分野 (小山田研)

### 学術情報メディアセンター

複合メディア分野 (中村裕研)

注 § 工学研究科電子工学専攻橋研と一体運営

## 複合システム論講座

<http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

### 自動倉庫システムの入出庫スケジューリング問題

本研究室で扱っているシステム最適化のテーマの中から、今回は、自動倉庫システムの入出庫スケジューリング問題について説明します。

自動倉庫システム (Automated Storage and Retrieval System; AS/RS) とは、工場や物流センターなどで部品・製品の入出庫を自動的に行うためのシステムです。自動倉庫システムは、物品を保管するための「(立体) 棚」、物品を運ぶための機械である「入出庫機」と、物品を倉庫に搬入したり搬出したりするための出入口である「入出庫口」から構成されます。AS/RSの一例 (立体自動倉庫システム) を図1に示します。この場合、入出庫機としてはスタッカークレーンが用いられ、各通路に一台ずつ設置されたスタッカークレーンが棚の間を行き来して物品を入出庫させます。また、入出庫口は通路の端に設けられます。

このようなAS/RSを効率よく運用するためには、様々な問題を考えなければなりません [1]。その中の一つ、入出庫スケジューリング問題は、与えられたいくつもの入出庫品をなるべく短時間で運び終わるよう、入出庫機の移動経路を決定する問題です。入出庫機が複数の品物を同時に運べる場合、この問題は NP 困難となるため、容易には解けないと考えられます。そこで、文献 [2] では、入出庫機が複数の品物を同時に運べる場合について、本問題と密接な関係がある「配車問題 (Vehicle Routing Problem; VRP)」と呼ばれる問題に対する最近の研究成果をもとに、効率のよい厳密解法を構成する研究を行っています。具体的には、まず、問題を0-1整数計画問題として定式化し、つぎに、定式化した問題に列生成とカット生成を繰り返し適用することにより最適解の下界値と上界値を計算し、その後、混合整数計画問題の汎用ソルバを用いて最適解を探索する、という解法を構成しました。そして、既研究の近似解法と遜色ない速度で最適解を求めることができることを示しています。

また、ここでは詳しく紹介できませんでしたが、上述の問題とは別の設定でも、入出庫スケジューリング問題に対する厳密解法の研究を行っています [3]。

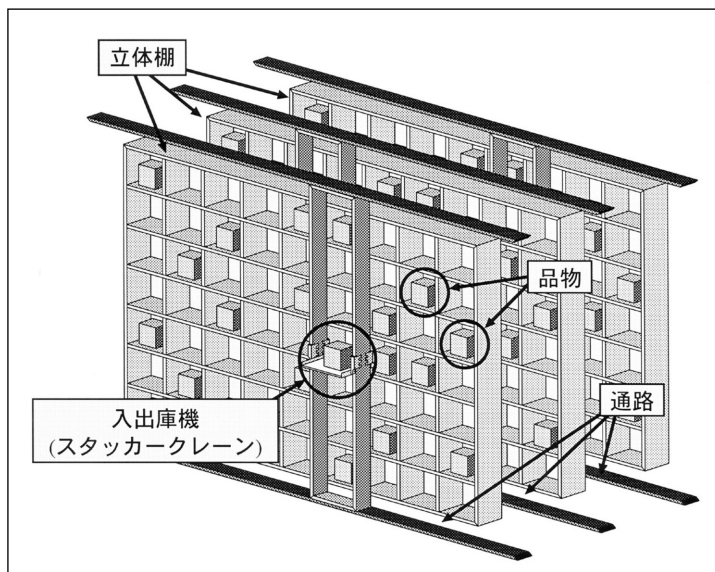


図1. 立体自動倉庫システム

#### 参考文献

- [1] 田中、木瀬：自動倉庫システムにおけるスケジューリング問題、システム/制御/情報、Vol. 50, No. 11, pp. 418-423 (2006)
- [2] 田中、荒木：立体自動倉庫の入出庫スケジューリング問題に対する厳密解法、計測自動制御学会論文集、Vol. 42, No. 9, pp. 1058-1066 (2006)
- [3] S. Tanaka and M. Araki: Routing problem under the shared storage policy for unit-load automated storage and retrieval systems with separate input and output points, 2006 International Symposium on Flexible Automation, pp. 593-600 (2006)

## 電磁工学講座 超伝導工学分野

<http://www-lab04.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.j.html>

## 「次世代高温超伝導線材を適用した磁気エネルギー貯蔵装置用コイルの開発」

当研究室では、平成16年度より実施されているNEDOの委託事業「超伝導電力ネットワーク制御技術開発」の一環として、中部電力（株）殿と共同で電力系統制御用超伝導磁気エネルギー貯蔵（Superconducting Magnetic Energy Storage: SMES）用コイルの開発を行っています。SMESシステムの中心要素である超伝導コイルの製作に際しては、冷却コスト低減の観点から酸化物系高温超伝導線材を適用することが不可欠であります。本研究では、極めて高い通電性能を有するイットリウム系次世代線材を対象としており、ISTECを通じてNEDOの委託により中部電力（株）が作製しているMOCVD-YBCO線材の適用を検討しています。ここでは、上記高性能導体を適用した高温超伝導SMES用コイルの概念設計結果について紹介します。

設計に適用したMOCVD-YBCO線材（幅：10mm、厚さ：200  $\mu$ m）の臨界電流（ゼロ抵抗状態を維持する最大電流）は77.3K・自己磁界条件下において280Aです。コイル形状としては、漏洩磁界低減や線材使用量最小化等の検討からトロイダル型を採用します。設計に際しては、3次元有限要素法ならびに遺伝アルゴリズムを連携した最適設計プログラムを開発し、またMOCVD-YBCO線材の非線形通電特性としては、パーコレーション遷移モデルと呼ばれる物理モデルに立脚した解析式 [1] を適用します。

図1には、一例として運転温度20K、蓄積エネルギー20MJにおける設計結果を示します [2]。また、図2には、比較のため、シャープ亀山液晶工場に導入されている低温超伝導SMESの鳥瞰図を示します [2]。図1と2の比較から明らかなように、次世代線材を適用することにより、運転温度が20K程度の高温であるにもかかわらず、高磁界化に伴う小型化が可能であることを示すことに成功しました。なお、大容量SMESの設計に際しては、コイルに働くフープ応力を低減することが極めて重要ですが、当研究室では上記応力を大幅に低減できる疎巻線法を提案しており [3]、今後は小型モデルコイルで私共の設計結果の妥当性を実証していきたいと考えています。

## 参考文献

- [1] T. Nakamura, et al., Superconductor Science and Technology, vol. 15(2002) pp. 230-235.
- [2] K. Higashikawa, T. Nakamura, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, in press.
- [3] 東川甲平, 中村武恒, 長屋重夫, 平野直樹, 式町浩二, 特願2006-303235号

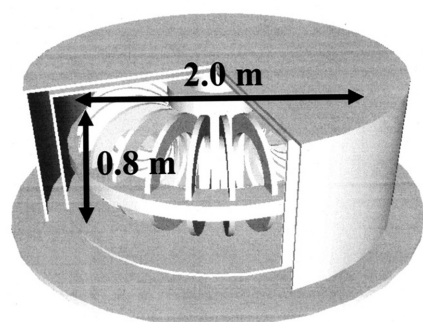


図1. 20MJ級高温超伝導SMESマグネット  
(運転温度：20K, 最大磁界：12T)

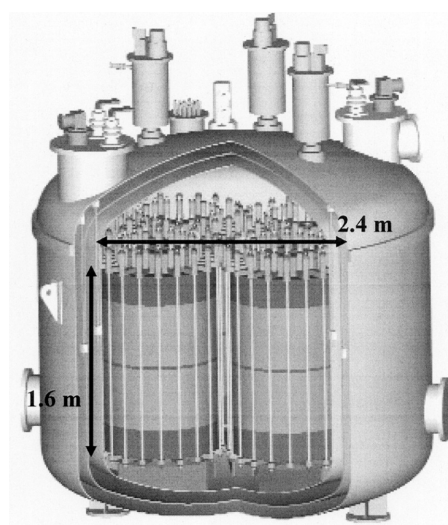


図2. 20MJ級低温超伝導SMESマグネット  
(運転温度：4.2K, 最大磁界：5T)

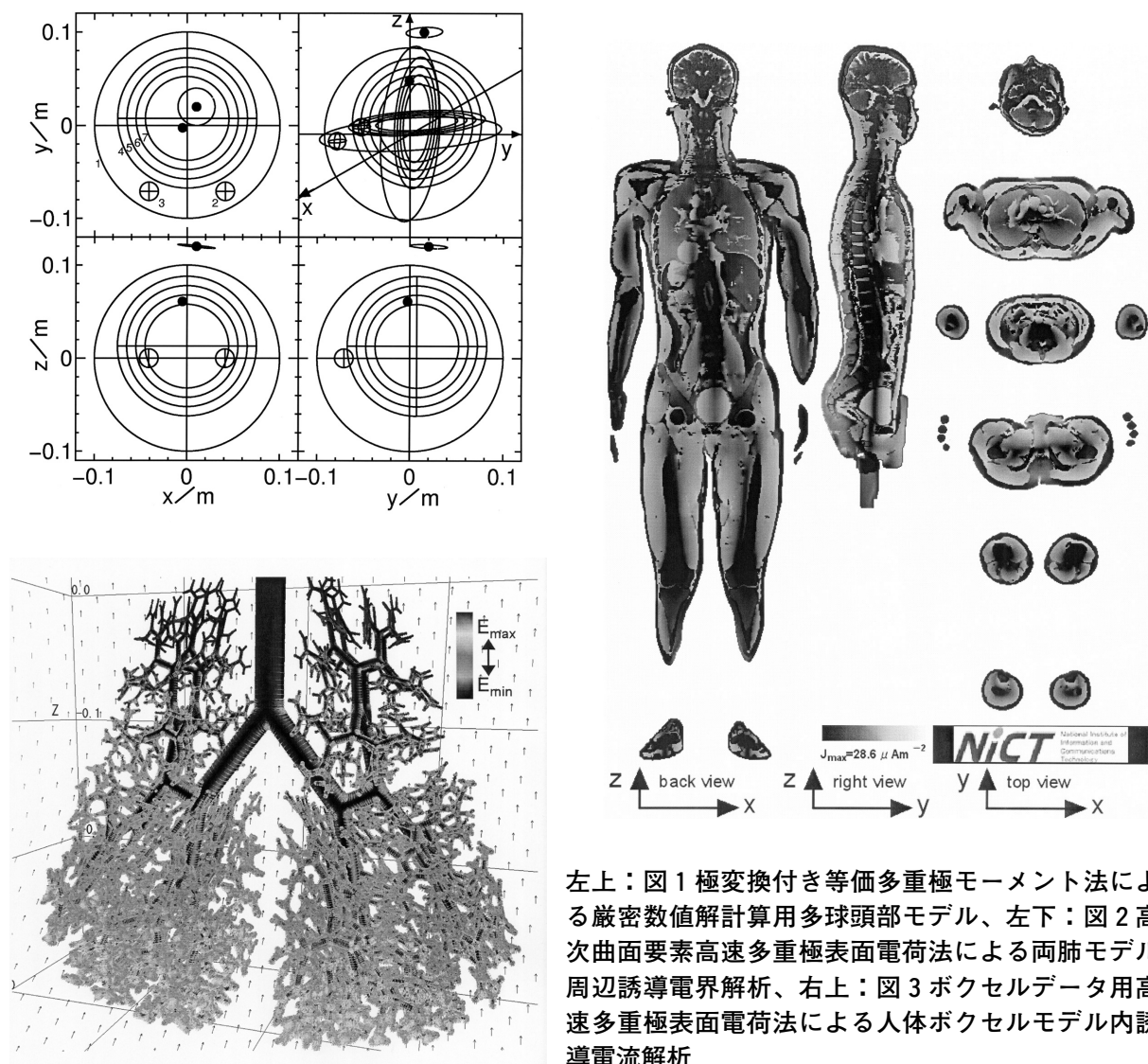


## 電気エネルギー工学講座 生体機能工学分野（小林研究室）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/lab03/>

## 「人体内誘導電界および脳神経活動磁界の数値計算法の高精度・高速・大容量化」

人体と電界・磁界との相互作用について関心が高まっており、これに関連する研究が活発に行われている。一方には、交流磁界曝露によって誘導される人体内電界・電流が健康影響を及ぼすことがないかなどといった悪影響防止という観点からの研究があり、もう一方には脳神経活動電流に伴う生体磁気を多点計測して脳神経活動の推定を行うなどといった有効利用の観点からの研究がある。いずれにしても詳細な人体モデルに基づく精密な電界・磁界解析の遂行が必須となっている。本研究では低周波領域での人体内誘導電界・脳神経活動磁界計算法の開発とその高精度・高速・大容量化を図っており、以下にその成果の一部を示す。なお、これら2種類の一見異なる計算は実は等価（相反的）であり、どちらか一方の計算結果を得ればもう一方の計算結果も相反定理により換算値が得られる。図1は極変換付き等価多重極モーメント法による低周波厳密数値解（10数桁）計算用の多球頭部モデルの例である。図2は高次曲面要素高速多重極表面電荷法による両肺モデル周辺電界の解析例である。図3はボクセルデータ用高速多重極表面電荷法による人体内誘導電界・電流密度の解析例である。図3は800万ボクセル（2mm立方体）、400万境界（表面電荷）要素の計算例で、Core2Duo 2.66GHzのPCを用いて計算時間は約1.5時間となっている。



左上：図1 極変換付き等価多重極モーメント法による厳密数値解計算用多球頭部モデル、左下：図2 高次曲面要素高速多重極表面電荷法による両肺モデル周辺誘導電界解析、右上：図3 ボクセルデータ用高速多重極表面電荷法による人体ボクセルモデル内誘導電流解析

## 電気システム論講座 電気回路網学分野 (和田研究室)

<http://bell.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

### 「単一導体線路上における電流伝搬の解析」

#### 1. コモンモードと単一導体線路：帰路線をもたない電流伝搬

私たちの研究室では、従来の電気回路では十分に扱えなかった電氣的・磁氣的結合も考慮した、新しい電気回路理論の研究と、これを実際のデジタル回路などの設計に応用する研究を行なっています。回路の動作周波数の高速化にともない、電子機器や通信線から発生するノイズが問題となっていますが、これらのノイズはいわゆるコモンモードによる放射が大きな原因として注目されています。

信号を送る配線を線路と呼びます。2本の導体から成る線路を考えると、通常の信号伝送に使用される差動モードは2導体上を互いに逆方向の電流が流れるモードですが、これとは別にコモンモードと呼ばれる2導体を同方向に電流が流れるモードも考えられます。この場合、コモンモードは見かけ上、帰路線をもたないという特徴をもちます。帰路線をもつ場合の電流伝搬は通常の電気回路で考える通りですが、帰路線をもたない場合の電流伝搬の仕組みは必ずしも明らかではありません。そこで、帰路線をもたない電流伝搬の仕組みを明らかにするために、最も単純な場合である1本の導体から成る線路、つまり単一導体線路上の電流伝搬のメカニズムについて研究しています。

#### 2. 電流伝搬のメカニズム

図1に示すような単一導体線路を考えます。端点に電流源をおき、そこから電流が伝搬する様子を解析します。注入された電流と電荷が導体表面の各点につくる電界を求め、その電界によって電流が誘導されるというモデルです。このような誘導の繰り返しにより電流伝搬のメカニズムを考えます。実際にはラプラス変換を用いて効率的に計算を実行します。ステップ電流を端点に注入した場合に計算により求められた電流波形（図2）を見ると、ステップ電流の先端が鈍りながらも伝搬している様子が分かります。提案した手法では電流伝搬の因果関係を明らかにしながら解析できることが特徴ですが、この解析から先端部の鈍りによって蓄積される電荷が電流伝搬に大きく寄与していることが明らかになりました。

#### 3. 局所的な物理量による解析

単一導体上の電流伝搬においては、通常の電気回路で考える電流と電圧ではなく、電流と電荷による作用を考えています。これは電流も電荷も局所的に定義できる物理量であるため、電磁界の基本式であるMaxwell方程式との整合性がよいからです。このように局所的な物理量を用いることにより、電気回路の新しい解析手法を考え、非常に高い周波数にも適用できる理論をつくることに取り組んでいます。

#### 参考文献

- [1] T.Hisakado, K. Yoshimura, K.Okumura: "Analysis of Common Mode Propagation Based on Single Conductor Line," Proc. PIERS2006, 1P3, pp. 76-80, 2006.

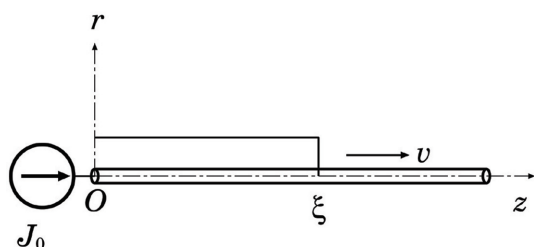


図1：単一導体線路のモデル

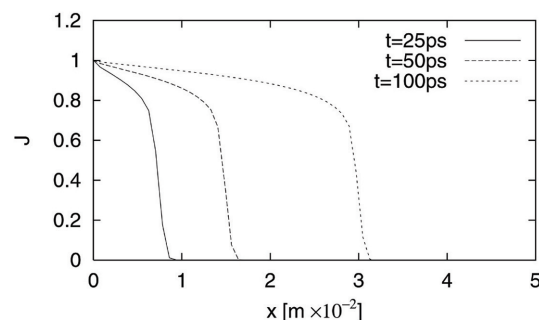


図2：単一導体線路を伝搬する電流波形  
(ステップ入力)

## 電気システム論講座 自動制御工学分野（萩原研究室）

### フィードバック制御性能向上のための基礎研究としてのロバスト制御/解析—サンプル値制御系の周波数領域理論とその周辺の話から

#### 1. 背景と目的

現在の状況を随時把握し適切な修正動作を加え続けるフィードバックの考え方は、普遍的な考え方として至るところで見られる。工学分野における多くの応用では、制御装置はデジタル化されたものとなっており、フィードバックは周期的なサンプリングデータに基づいてなされる間欠的動作となる。一方、制御対象がたとえば環境との間で持つ相互作用は連続的である。このような、周期的間欠動作で連続的動きを制御するフィードバック制御系は、サンプル値制御系と呼ばれている。その応用範囲の広さから、サンプル値制御系の性能、とくに環境などのパラメータの変動や対象とするシステムのモデル化における不確かさに対して性能を保持できるロバスト性を向上させることが重要である。

#### 2. 周波数領域での取り扱いとナイキストの安定判別法

ロバスト性を扱う上で周波数領域での考察が有効である。周波数領域での議論において重要な役割を果たすのが伝達関数であり、ナイキストの安定判別法である。しかし、古典的な伝達関数もナイキストの安定判別法も、時不変性と呼ばれる性質を持つ制御系を対象としたものであり、サンプル値制御系には適用できない。サンプル値制御系が周期的なサンプリング動作を伴うため、その性質は周期的時変性を伴うものとなり、時不変性という単純な性質を必然的に失うためである。この点を無視して時不変性を持つとしての扱いが広く行なわれるが、制御性能向上のためには、より厳密な取り扱いを可能とする基礎理論が必要である。我々は、周期的時変性を持つシステムをなんら近似なく厳密な変換により（無限次元性という代償のもと）時不変性を持つシステムとして表現することのできる手法である、リフティングと呼ばれる手法を応用した研究を行なっている。これは、伝達関数に代わって関数空間上での伝達作用素を用いてシステムを表現するものであり、この考え方に基づき、ヒルベルト・シュミット作用素の2次正則化行列式という概念などを用いてサンプル値制御系に対するナイキスト安定判別法を導出するなど、基礎となる成果をあげている。

#### 3. 正実性に基づくロバスト性解析など、一般的なロバスト安定条件

上記のナイキスト安定判別法から、サンプル値制御系のロバスト安定性に関する一般的な定理がさらに導出できる。この定理は、想定される変動や不確かさなどの範囲のもとでのロバスト安定性の必要十分条件を与えるものであり、サンプル値制御系の性能向上を図る上での理論的な出発点となる重要な成果である。しかし、現実の課題に即した個々の状況において、この必要十分条件が成立するか否かを一般的かつ具体的に判定することは、残念ながら容易でない。そこで、通常は、必要十分条件として要求されるものよりも強い条件（したがって十分条件）であるものの、その判定はより容易に行なえるような何らかの条件の成立を判定することで代用することが行なわれる。その代用は、具体的には、必要十分条件に含まれるセパレータと呼ばれる作用素の持つ自由度に制限をかけることで行なわれる。

ここで、どのような代用条件（つまり制限されたセパレータ）を用いるかは、制御性能向上の成否の鍵を握るものといえるが、そのひとつとして正実性に基づく方法がある。正実性とは、LCRからなる電気回路のイミッタンスの持つ性質としても知られるが、これをより一般的な形で伝達作用素に拡張した性質である。正実性は、システムの位相特性とも密接な関係があり、このことと関係するものと思われるが、正実性は、（位相特性に周波数依存性を持たない）実数パラメータで不確かさが表される場合のロバスト性解析との相性がとくに高い。しかし、セパレータは本来はかなり高い自由度を有しており、それを正実性に対応した形のみに制限して利用するのは得策でない。セパレータの持つ自由度は興味深い数学的構造を有しており、それを利用してより有効な方法を導くための研究を現在進めている。

## 電子物理工学講座 プラズマ物性工学分野（橋研究室）

<http://plasma1.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「次世代スピネレクトロニクス薄膜材料プロセスの開発」

スピネレクトロニクスという次世代技術により、従来に無い新しい機能を有するデバイスの誕生が期待されています。現代の情報化社会を支えるエレクトロニクスは、電子の電荷という電気を運ぶ性質を有効に利用していますが、さらに電子は「スピン」という磁石としての性質を兼ね備えています。スピネレクトロニクスとは、電荷に加え、スピンをも有効に活用することにより、従来の電荷制御によるエレクトロニクスの限界を超えようとする技術です。本研究室では、透明性、導電性を損なうことなく、さらに磁性材料としての機能を併せ持つ新しい透明導電膜の開発を進めています。例えば、フラットパネルディスプレイ産業などで透明電極として広く用いられているITO（酸化インジウムスズ）の高周波スパッタ作製時に、適量のマンガンを添加することにより、ITOの優れた透明性、導電性、安定性を保持したまま、室温以上で強磁性を示す透明導電膜を低温条件で作製することに成功しました。我々が作製したMnドーピングITO薄膜について、300Kにおける磁化の磁界依存性を図1に示します。ヒステリシス特性が得られていることから、作製した試料が室温においても強磁性を示すことが確認できます。本研究成果を活かして、有機基板・フィルム上に成膜して、折り曲げ可能なスピネレクトロニクスデバイスを創製したいと考えています。

また、マンガンを含む酸化物については、 $(\text{Pr,Ca})\text{MnO}_3$  (PCMO) などの巨大磁気抵抗材料を中心に、高抵抗状態と低抵抗状態との間のスイッチングを利用した新しい抵抗変化型不揮発性メモリ（Resistance Random Access Memory: ReRAM）への応用のための研究も進めています。我々はこれまでに、大面積均一成膜、組成制御性、段差被覆性等に優れた有機金属化学気相成長法（Metalorganic Chemical Vapor Deposition: MOCVD）により、他の手法より低温でPCMO薄膜を作製し、その抵抗変化によるメモリ動作の確認にも成功しました。その結果の一例を図2に示します。得られたPCMO薄膜の抵抗値は、印加した電気パルスの極性に応じて変化しました。ReRAMは、構造がシンプル（二端子素子）であり、室温で大きな抵抗変化を示します。このように大容量化に最適で、低消費電力、高速、多値化可能という特長も有することから、次世代ユニバーサルメモリの有力候補として、その実用化に向けた研究に鋭意取り組んでいます。

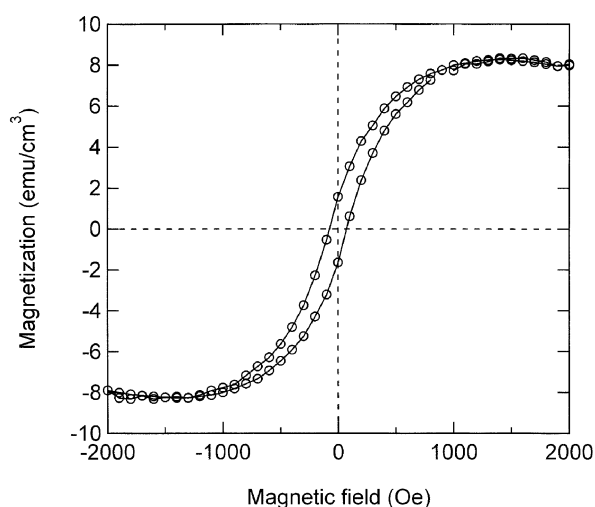


図1. 300KにおけるMnドーピングITO薄膜の磁気ヒステリシス

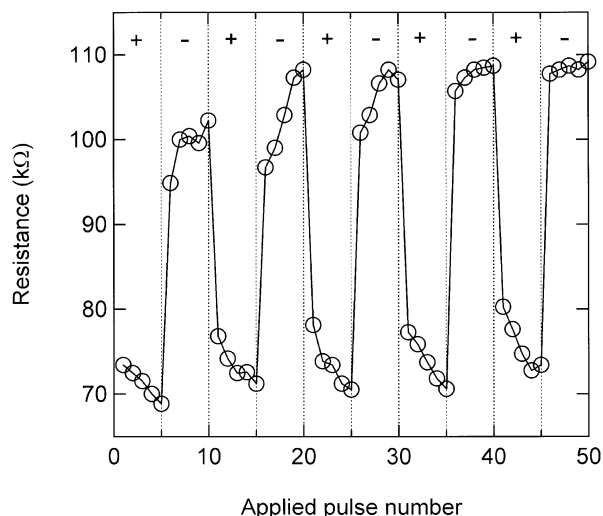


図2. 電気パルス印加による $(\text{Pr,Ca})\text{MnO}_3$ 薄膜の抵抗変化

## 電子物性工学講座 電子材料物性工学分野（松重研究室）

<http://piezo.kuee.kyoto-u.ac.jp>

## 「二酸化チタン光触媒発現機構の解明とその応用に関する研究」

二酸化チタン（チタニア、 $\text{TiO}_2$ ）に代表される光触媒材料においては、紫外線照射下での様々な分子の光分解反応、光誘起超親水化などの特異な現象が見出され、それらを基にした脱臭、抗菌・殺菌、防汚、防曇材料としての実用化が成されています。また、 $\text{TiO}_2$  にはこの光触媒作用だけでなく、その光・電気変換機構を利用した次世代太陽電池への応用が提案され、新しいクリーンエネルギー源としても期待されています。更に、社会問題化している自動車排気ガス対策の一環として、燃料電池車に用いる水素を光触媒反応による水の光分解を通じて、直接生産しようという試みも行われています。このように二酸化チタンは多くの先端技術分野において、環境改善対策の根幹を担うものとして期待されています。しかしながら、チタニアの光触媒反応には、紫外光照射下でのチタニア表面構造の変化、電子/正孔対（励起子）の生成と分離、表面原子空孔（酸素欠陥）の生成、表面水酸基やラジカルの生成など、様々なプロセスが複雑に絡み合っているため、反応メカニズムの解釈には未だに疑問点が数多く残っています。このような背景の下、本研究室では、走査型プローブ顕微鏡（SPM）や全反射X線面内回折などの特色ある測定技術を駆使して、紫外線照射下での二酸化チタン表面構造の追跡を行っています。そこで得られた知見を元に、チタニアにおける光触媒反応機構の解明を試みると共に、それを基礎とした新しい水素発生源としての応用を視野に入れた研究を進めております。

本研究結果の一例を以下に紹介します。紫外線照射下でのルチル型二酸化チタン（110）表面において、SPM技術の一つであるケルビンプローブ原子間力顕微鏡（KPFM）によって観察した表面電位測定結果を図1、2に示します。ここでは、ルチル（110）表面上に金（Au）と白金（Pt）電極を蒸着し、試料表面の電位分布を測定しています。図1に示すように、紫外線照射によって、真空中では Au 表面での電位が上昇しないのに対し、大気中では表面電位の上昇が観測されました。この電位変化は $\text{TiO}_2$  表面に吸着した水から光触媒反応で生成した化学種（プロトン（ $\text{H}^+$ ）、ヒドロキシラジカル（ $\cdot\text{OH}$ ））のうち、プロトンが $\text{TiO}_2$ 表面から Au 電極に向かって移動し、水素分子に還元されずに Au 表面に存在していることに起因すると思われます。つまり、紫外線照射によって、 $\text{TiO}_2$ 表面から Au 表面に向かう誘起電界が発生していることを示唆する結果です。一方 Pt 表面では、図2に示すように大気中での表面電位上昇が観測されず、プロトンが還元されて水素が発生するためであると考えられます。これは Pt 表面での還元力が Au 表面に比べて高いことによるものです。このように、紫外線照射下で生じる二酸化チタン光触媒反応に基づく興味ある現象が観測されております。

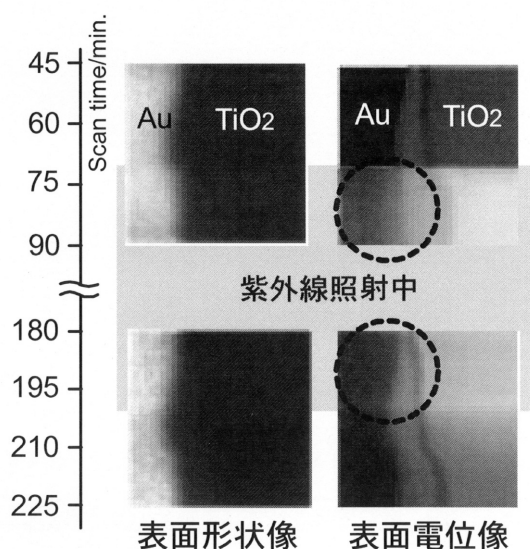


図1. 大気中でのAu/ $\text{TiO}_2$  試料の表面形状像と表面電位像（走査範囲： $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ ）

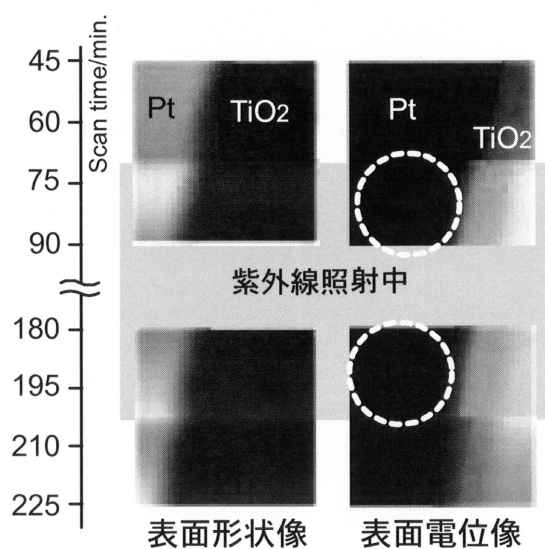


図2. 大気中でのPt/ $\text{TiO}_2$  試料の表面形状像と表面電位像（走査範囲： $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ ）

## 量子機能工学講座 光量子電子工学分野（野田研究室）

<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/lab05/>

## 二次元フォトリック結晶を用いた自然放出制御

自然放出は、次世代照明の本命として注目される発光ダイオードや光記録等に広く応用されるレーザーなど各種発光素子の発光の源である。一方で例えば発光ダイオードでは、発生した光の多くが外部に取り出されることがなく、そのまま発光体内部に留まり、やがて熱に換わってしまう不要な発光になる、といった問題がある。自然放出が不要な発光となるのは、自然放出は通常は制御されない状態にあるためである。本研究室では、フォトリック結晶と呼ばれる光の波長程度の周期的な屈折率分布をもつ光ナノ構造による自然放出の制御<sup>1-3)</sup>を研究しているが、ここでは二次元フォトリック結晶スラブによる自然放出制御に関して紹介したい。図1(a)に示す通常のスラブ発光体では図2(a)に示されるように発光の多くは、屈折率差によりスラブの中に閉じ込められたままとなり、不要な発光となる。図1(b)に示す二次元フォトリック結晶は、周期構造の存在する二次元面内における光の存在を禁止する二次元フォトリックバンドギャップ(PBG)をもつ。通常の発光体の場合は発光体に与えられたエネルギーの大部分が、不要な発光に浪費され、短時間でなくなっていく、外へ取り出される有用な発光の総量は非常に少なくなる。一方、二次元フォトリック結晶では、スラブ面内方向への発光が禁止され、与えられたエネルギーが不要な発光に使われることなく、ゆっくりではあるが着実に有用な発光に使われ、発光体の外部へと放射され、与えられたエネルギーが最終的には全て、外界へと取り出される自然放出となるために、発光効率が非常に高くなることが期待される。上記の予想を実験で確認するため、様々な格子定数 $a$ の量子井戸発光体をもつ試料を作製し、発光スペクトルと時間分解フォトルミネッセンスを測定した結果を図3に示す。これらの図から、PBG波長域に発光波長が入る場合は、確かに発光がゆっくりと起こり、外界へと取り出される総発光量が増加することがわかる。逆にPBG波長域に発光波長が入らない場合は、フォトリック結晶を形成していない通常の発光体の場合と同じく、発光が短時間で終了し、総発光量も小さくなっている。以上よりフォトリック結晶によって自然放出が制御できることが初めて明確に実証された。

1) S. Ogawa, M. Imada, S. Yoshimoto, M. Okano and S. Noda, Science 305, 227 (2004).

2) M. Fujita, S. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano and S. Noda, Science 308, 1296 (2005).

3) S. Noda, Science 314 (2006) 260.

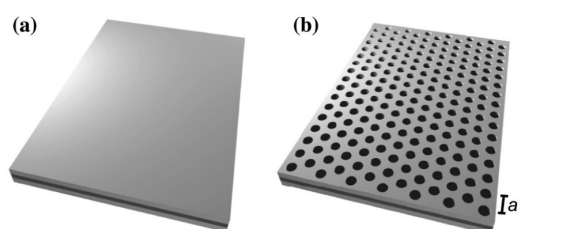


図1:(a)通常のスラブ構造と(b)二次元フォトリック結晶スラブの概念図

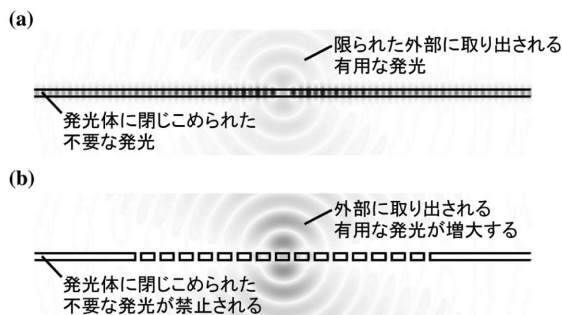


図2:断面図と発光の様子。(a)通常のスラブ発光体。多くの発光はスラブの中に閉じこめられる不要な発光となり、わずかな発光のみが外部に取り出される有用な発光となる。(b)二次元フォトリック結晶スラブ発光体。フォトリック結晶を導入することで不要な発光が禁止され有用な発光が増大する

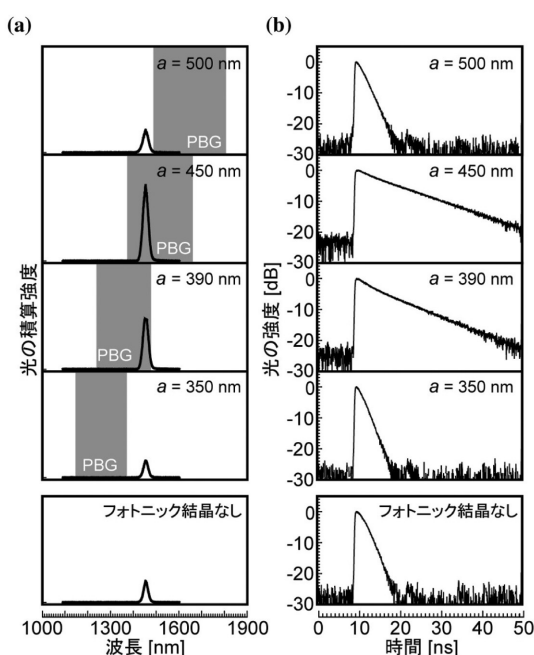


図3:フォトリック結晶および通常の量子井戸発光体の発光特性。フォトリック結晶の周期 $a$ を変化させることで、PBGの作用する波長域を変化させた。(a)発光スペクトル(b)時間分解フォトルミネッセンス



## 知能メディア講座 画像メディア分野（松山研究室）

<http://vision.kuee.kyoto-u.ac.jp/japanese/index.html>

### 「表情譜：機械は人間の微妙な表情を読み取れるようになるか？」

#### 1. 表情とは

人は誰かと話しをする時、表情を通じて自分の心理状態を伝えることができ、また、表情から相手の心理状態を読み取ることができる。このため、日常生活環境において人の活動や作業を支援するロボットなどにおいても、表情を通じた互いの心理状態の交換が重要になると考えられる。

従来の表情認識・生成の研究では、主として感情に基づく基本的カテゴリ（喜び・驚き・恐怖・怒り・嫌悪・悲しみ・軽蔑）に表情を分類することが検討されてきた。しかし、実際の表情は、相手に何を伝えたいかという目的に応じて意図的に作られるものや、情動や反射によって自発的に表出されるものがある。その結果、笑いの種類としても微笑み、大笑い、苦笑いなど多様なものが存在し、同じカテゴリ内でも全く異なる心理状態を表す表情が存在する。人は刻々と変化する相手の表情の微妙な動きを観察することで、基本的な感情カテゴリに比べてずっと微妙な他者の心理状態を推定していると考えられる。こうした微妙な表情を自動的に読み取るにはどうすればよいかが本研究の目的である。

#### 2. 表情譜による作り笑いと自然な笑いの識別

本研究では表情を、目や口、眉といった顔の部位が互いに連動して運動することによって生じるものと考え、「表情譜」という新たな表情変化の記述法を考案した。まず、顔の各部位の運動を、目が「開く」、「開いている」、「閉じる」といった単純な運動パターンで表される時間区間に区切る（図1過程A）。次に異なった部位における運動パターンの開始・終了タイミングの時間差を抽出することによって、表情変化のタイミング構造を記述する（図1過程B）。本研究では、このタイミング構造を定量的に分析することによって、作り笑いと自然な笑いが精度良く区別できることを実験によって確認した。また、これらの笑いを区別するためのタイミング構造特徴が個人によって異なることも確認した（図2）。これは、表情の表出法が各人の顔の構造やくせによって異なり、個性を考慮して表情を理解する必要があることを示唆している。一方、表情譜を生成した処理過程を逆にたどることによって、表情譜から表情変化の様子を映像として生成することもできる。これは、楽譜（「表情譜」）から音楽（顔映像）が生み出されるのに対応し、表情譜を編集することによって多様な表情の映像を生成することができることを意味する。

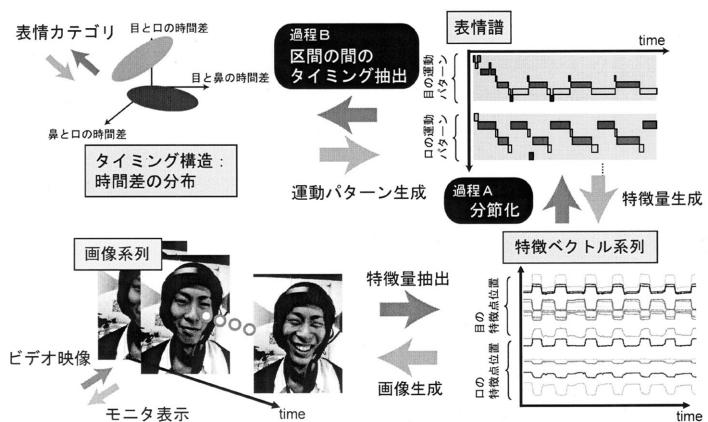
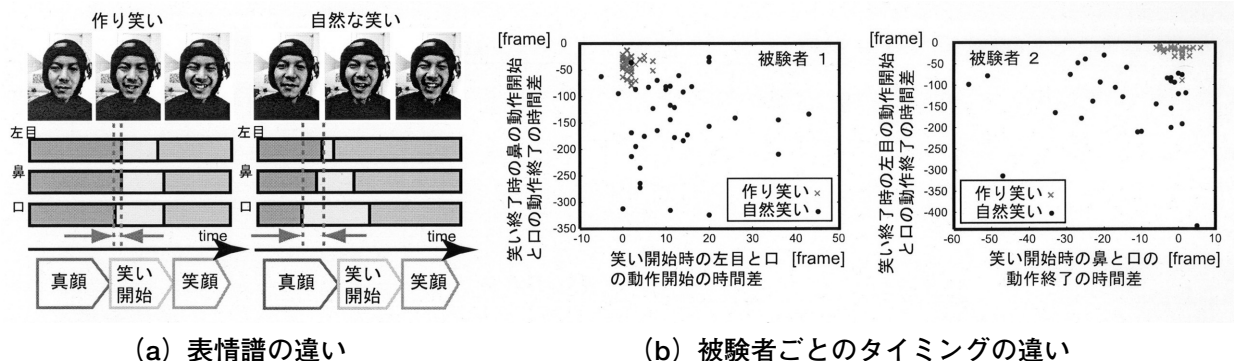


図1. 表情譜の生成過程



(a) 表情譜の違い

(b) 被験者ごとのタイミングの違い

図2. 作り笑いと自然な笑いの比較

## 通信システム工学講座 知的通信網分野（高橋研究室）

<http://cube.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

### 「光パケットネットワークのための適応型高速フロー制御プロトコル」

増大するインターネットトラフィックを処理するために、光技術の電気技術に比べた高速性や光特有の波長をパケットルーティングに用いる、光パケットネットワークの研究が進められています。光技術の大きな課題としてバッファメモリーの実現が困難な点があります。ファイバー遅延線やスローライトを用いた光FIFOなどが考えられていますが、電気技術のRAMにはかなわないため、光パケットネットワークでは通常のトラフィック状況でもパケット廃棄が発生すると想定されます。

インターネットでは、端末がパケットの受信状況を見ながら、送信速度を制御する自律分散的な制御方法が取られています。電気ネットワークは、大容量のバッファがネットワーク内に配置されているため、容量以上のパケットが到着したときにパケットが廃棄され、パケット廃棄を検出した端末が、送信速度を下げてふくそうを回避するフロー制御プロトコルが実装されています。通常状態でも廃棄が発生する光パケットネットワークに同じプロトコルを適用すると、端末間のスループットが著しく制限されるため、パケット廃棄に強い光パケットネットワーク向きのフロー制御プロトコルを検討しています。

検討しているプロトコルは、従来のウィンドウサイズ（単位時間に送信するパケット数に相当します）に加えてパケット長も制御します。図1に示すように、パケットの受信状況に応じて、ウィンドウサイズとパケットサイズを増減させます。廃棄原因が、光ネットワークか電気ネットワークかに応じて、適応的にフロー制御パラメータを制御し、特に光ネットワークがスループット制限要因となる場合は、飛躍的にスループットを向上させることができます（図2）。今後は端末間のスループットの公平性や、他のプロトコルの端末が共存した場合の特性評価と対策の検討を行います。

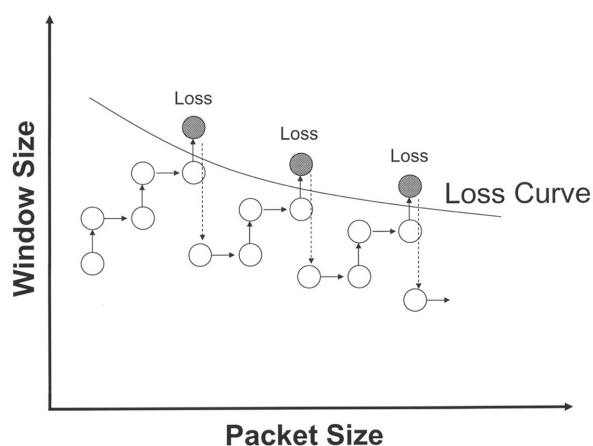


図1. フロー制御の原理

参考文献：Z. Miao, H. Yamamoto, and T. Takahashi, “Throughput analysis of adaptive flow control protocol for optical packet switching networks,” in Proc. IEEE GLOBECOM, Session W11.1-3, Dec. 2005.

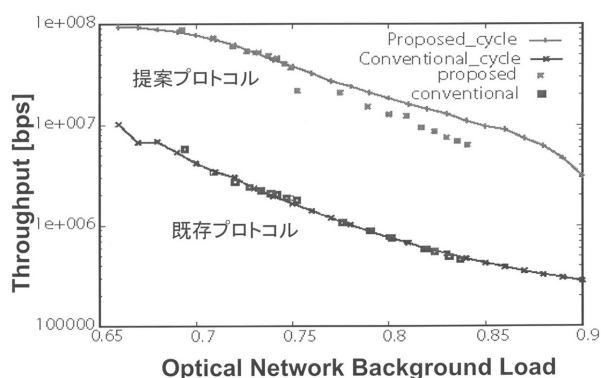


図2. フロー制御プロトコルの特性



## 集積システム工学講座 情報回路方式分野（中村研究室）

<http://www-lab09.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「自律修復による耐故障再構成可能デバイス」

デバイス上のSRAMセルに書き込まれた構成情報によりその機能をユーザが自由に書き換えることができるハードウェアとして、FPGAに代表される再構成可能デバイスが近年広く使われている。このデバイスは、リモートからのシステム更新や物理故障に対する擬似的な修理も可能であるため、宇宙開発などメンテナンスが困難かつ高信頼性が要求される分野での利用が期待されている。しかし、宇宙空間では放射線や荷電粒子などによる記憶素子のビット反転、すなわちソフトエラーが多発する。再構成可能デバイスの構成情報が破損した場合、意図しない回路が構成され、機能を損なうばかりかシステムに障害を与える危険性がある。そこで中村研究室では、動的再構成技術を応用し、システムの動作を止めることなく自律的に構成情報の破損を検知・修復する機構を組込んだ耐故障再構成可能デバイスのアーキテクチャを提案した。

提案デバイスは、エラー修復動作の単位である自律修復セルと呼ばれる基本要素から構成される（図1）。自律修復セルは、冗長化された演算機能とメモリ、および自律修復のための制御回路からなる。本研究では自律修復セルの実現方式として、多重化に基づいた a) 単純多重化、b) メモリ多重化の2方式、エラー訂正符号に基づいた c) ECC（Error Correcting Code）常時訂正、d) ECCロールバックの2方式を提案し（図3）[1]、各方式について、冗長性による回路規模オーバーヘッドと平均寿命とのトレードオフを明らかにした（図2）。いずれの方式も、耐故障性を持たない従来の再構成可能デバイスでは平均寿命約1分という環境下で、100年以上の平均寿命を達成できる。

この結果を元に、提案修復方式を既存再構成可能デバイスに適用し、宇宙環境においても10年以上の平均寿命を達成することを示した [2]。提案デバイスの概略図を図4に示す。論理を実現するロジック部分には、回路規模オーバーヘッドが小さい単純多重化方式を採用し、ロジック間を接続する配線には、信号の遅延が小さいメモリ多重化方式を採用している。

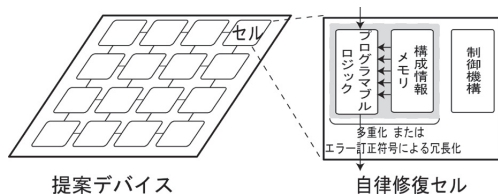


図1：提案デバイスと自己修復セル（概念図）

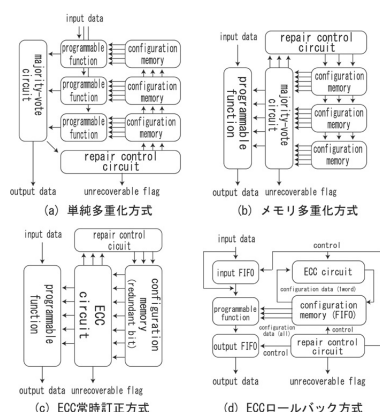


図3：自律修復セルの実現方式

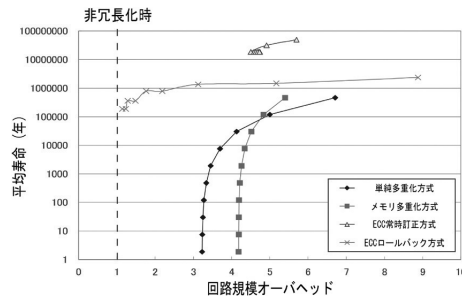


図2：回路規模と平均寿命のトレードオフ

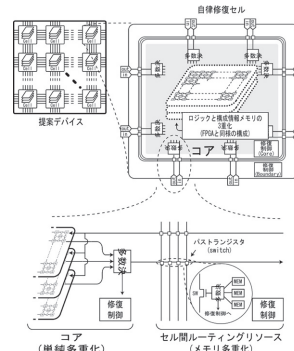


図4：提案耐故障再構成可能デバイス

## 参考文献

- [1] K. Nakahara, S. Kouyama, T. Izumi, H. Ochi and Y. Nakamura, "Autonomous-Repair Cell for Fault Tolerant Dynamic-Reconfigurable Devices," in Proc. of FPGA, pp. 224, Feb. 2006.
- [2] K. Nakahara, S. Kouyama, T. Izumi, H. Ochi and Y. Nakamura, "Fault Tolerant Reconfigurable Device Based on Autonomous-Repair Cells," in Proc. of FPL, pp. 461-466, Aug. 2006

# 集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤研空室）

<http://www-lab26.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

## 「マルチスタティックレーダーによる大気の高分解能観測」

大気レーダーは、大気中に常に存在する乱流に伴う屈折率の擾乱による電波の散乱を用いて、上空の大気の流れ分布を測定する観測装置である。風速の測定にはドップラー効果を利用するが、単一のアンテナを送受信に用いる通常のモノスタティックレーダーにより測定できるのは、風速ベクトルを観測方向に投影した1成分のみである。そこで図1左のように、風速が水平方向には一様であると仮定して、異なる3方向以上にアンテナビームを走査し、得られる視線方向速度成分から風速ベクトルの鉛直分布を推定する方法が用いられてきた。しかし、実際の風速場は、例えば雲の中の対流のように小さな空間スケールで変動する場合があります、測定誤差の原因となっていた。これに対して、図1右のように、送受信を行う主アンテナとは別に、受信専用の小規模なアンテナアレイ2組を追加し、3組のアンテナを用いて観測するマルチスタティック方式の大気レーダーを開発してきた。この方式では、送信ビームが照射する領域を異なる3方向から観測することにより、風速ベクトルの3次元分布を測定することができるため、従来のモノスタティック方式に比べて水平分解能が飛躍的に向上する。

ただしこの方式では、受信アンテナから見た各散乱体の方向が高度により変わるため、観測高度に応じて受信アンテナビーム方向を走査する必要がある。この機能を実現するため、図2に示すデジタル受信機を開発し、アレイを構成する個々のアンテナ素子の受信信号を直接AD変換して記録し、受信後に観測方向に応じて位相を調整して合成する方式を用いた。

さらにこの方式では、受信アレイの指向性パターンを受信後に自由に変更できるため、山などからの強い不要反射波を適応的に除去するアダプティブアンテナ技術を併用することが可能である。この技術をインドネシア・スマトラ島の赤道大気レーダーに適用し、連続観測を行ってその有効性を検証した。

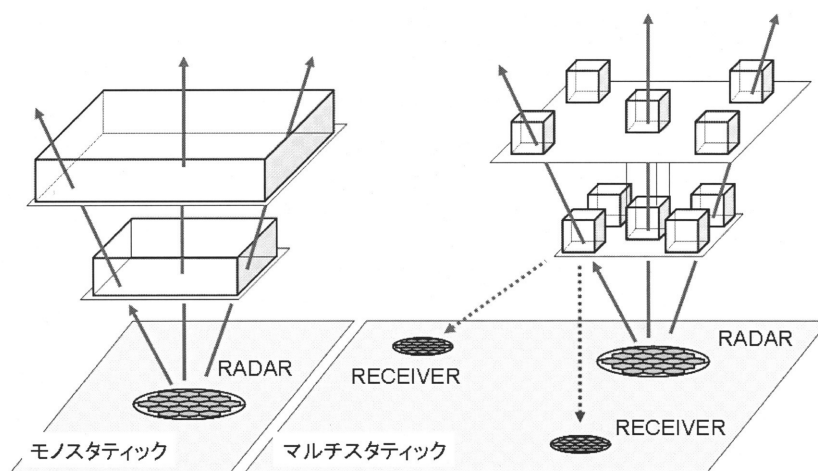


図1. 大気レーダーの方式

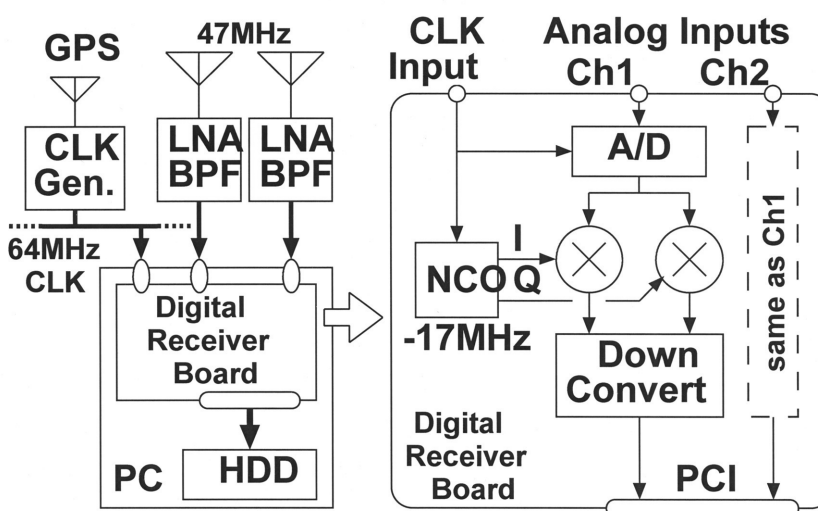


図2. デジタル受信機システムの構成

## 参考文献

K. Nishimura et al., J. Meteor. Soc. Japan, Vol.84A, pp. 227-238, 2006.

## システム情報論講座 画像情報システム分野

<http://www.image.kuass.kyoto-u.ac.jp/intro.html>

## 「顕微鏡写真を用いた木材の個体識別」

家屋・家具から装飾品にいたるまで木材はありとあらゆる所に利用され、我々の生活を豊かなものになっている。しかし近年、地球温暖化の影響や過剰伐採などによって森林資源は減少の一途を辿っている。このため、国際条約で守られているはずの森林において違法伐採が行なわれたり、高級木材を騙った木工品が市場に流通したりするなど様々な問題が生じている。これらの違法行為の摘発には木材の識別が不可欠であるが、加工材からの樹種判定や伐採地の特定には専門的知識と経験が要求されるため [1]、税関などの現場でこれを取り締まることは難しい。そこで我々のグループでは生存研（旧木質研）杉山研究室と共同で、木材を自動識別するシステムの開発を進めている。

本システムは、木材から切り出した微小切片の顕微鏡写真画像から樹木特有の特徴量を抽出し、この特徴量に基づいて樹種識別を行うものである。特徴量は大きく、樹木の細胞組織を反映した形状情報と画像の局所的な濃淡変化に基づいた統計的特徴量の二つに分けられる。

形状情報の代表例として、道管（根から枝葉への水や養分の通り道）の形状や配置が挙げられる。木口面（樹木の幹を水平にスライスした断面）において、道管は図1のように白く大きな円形領域として現れる。道管の大きさ、個数、並び方は樹種ごとに大きく異なるため、これらの特徴を利用した樹種識別手法がまず考えられる。そこで、各木材から採取した切片画像に対し、二値化、オープニング演算、輪郭抽出を順に行うことで道管領域の抽出を行った。抽出結果の一例を図2に示す。図3は原画像と抽出結果を重ねて表示したものであり、本手法による道管の抽出がほぼ正しく行われていることがわかる。各道管の太さはこれらを囲む外接円の直径として求められる。（図3参照）

統計的特徴量には、同時生起行列に基づく14種の特徴量とフラクタル次元を用いた。これらの特徴量を教師画像、未知の標本画像に対してそれぞれ求め、両者の類似度をもとに樹種判定を行った。

20種類の木材（標本画像数560）に対して本手法による個体識別実験を行ったところ、個体識別の成功率は約9割と良好な結果を得た。しかし同じ樹種であっても、樹齢や生育環境の違いによる道管形状のばらつきのために異なる樹種と見なされたり（ハリギリ、コナラなど）、よく似た道管構造を持つ異なる樹種（例えばアベマキとクヌギ）を同一樹種と誤判定してしまったりする場合があった。

各特徴量の性質をさらに吟味して識別結果への重み付けを適正化するとともに、より有効性の高い特徴量を見出し、本システムに導入していくことが今後の課題として挙げられる。

## 参考文献

- [1] IAWA委員会：“広葉樹林の識別 IAWAによる光学顕微鏡特徴リスト”，海青社，1988

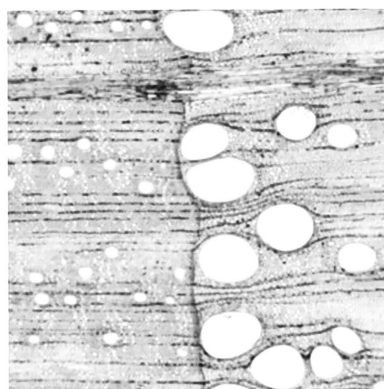


図1. 元画像（アベマキ）

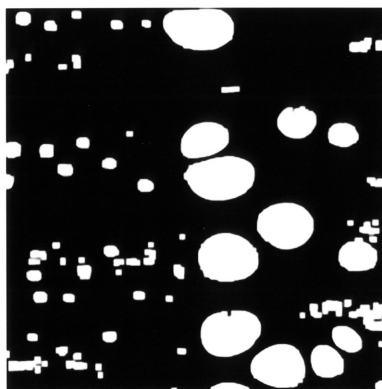


図2. 道管抽出の例

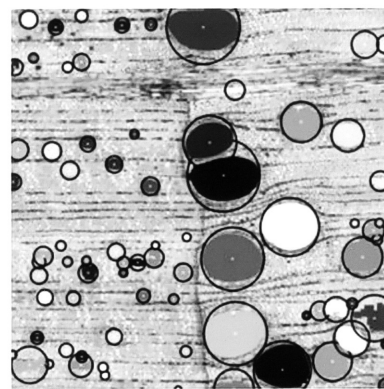


図3. 元画像との重ね合わせ

## エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (近藤研)

<http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/>

## ヘリオトロンJプラズマの真空紫外分光

高温プラズマの研究は、ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor : 国際熱核融合実験炉) に代表されるように21世紀のエネルギー源として有望視されている核融合発電を目指し世界各国の共同と競争の下に大きく展開されている。京都大学ではエネルギー理工学研究所にある先進ヘリカル閉じ込め装置であるヘリオトロンJ装置がより効率のよい閉じ込め特性を探求することを目標として研究が進められている。高温プラズマのエネルギー閉じ込めをよくするためには閉じ込め磁場に関係なくエネルギー損失がある高温不純物イオンからの放射損失を少なくすることが重要である。ヘリオトロンJプラズマのように電子温度が1 keV程度まで上昇すると放射の波長領域は100nm以下の真空紫外領域に分布する。この波長領域では金属面からの反射効率が極端に減少するため分光素子として最小限の凹面回折格子のみを使用するコンパクトで波長分解能のよい真空紫外分光器を京都市内の町工場で製作しヘリオトロンJプラズマにおける不純物イオンの挙動を調べている。図1はこの分光器を、図2はヘリオトロンJ装置に取り付けた状態を示す。

図3はヘリオトロンJプラズマで計測された代表的なスペクトルでヘリオトロンJ装置を構成しているステンレスからの鉄が顕著に認められる。これらのスペクトル線の同定はそれほど簡単ではなく15~25nmに分布する電離電圧に近いFeIX~FeXIVイオンでは、いずれのイオンに帰着させるかが困難な場合が多い。またこれらのイオンの価数分布はプラズマの生成方法によっても大きく異なる。中性粒子ビーム入射によって生成されるプラズマと電子サイクロトロン共鳴を利用して生成されるプラズマでは内部に生成される電場の方向が反対になる可能性があり、その電場によって高電離イオンの挙動が変わることが知られている。図4は中性粒子ビーム入射プラズマ中の鉄イオンのプラズマ断面上種々の位置における発光強度の時間変化を示しているが、時間とともに発光領域がプラズマ中心部へ集中している様子が伺える。将来的にはプラズマ中の電場、周辺部の磁力線構造を利用してプラズマ中の高電離イオンの挙動を自由に制御することを考えている。

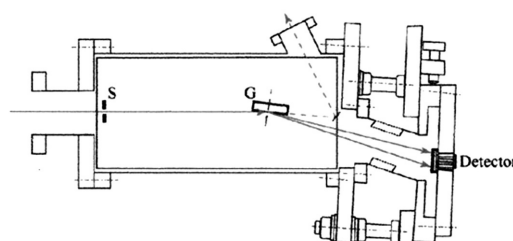


図1

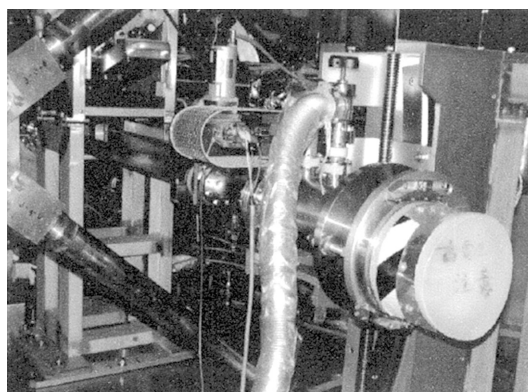


図2

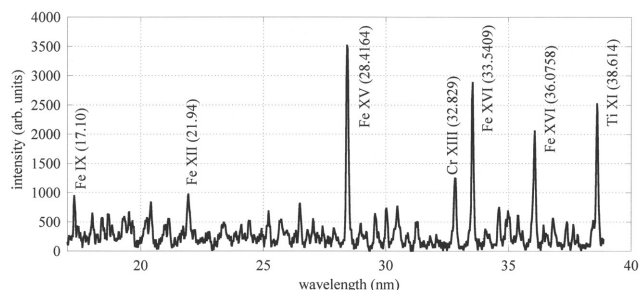


図3

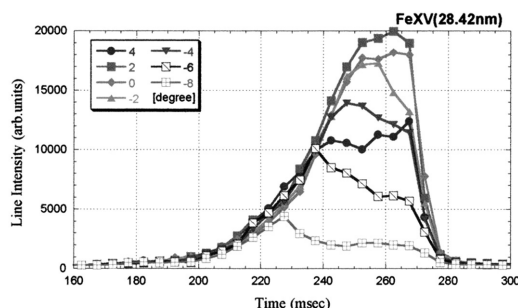


図4

## 参考文献

cue NO.13 JUNE 2004 p7

先進ヘリカル磁場配位のヘリオトロンJ装置による高温プラズマ閉じ込め研究

## 応用熱科学講座 応用基礎学分野（野澤研究室）

<http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/>

### 「Chain FRAMを用いた新強誘電体機能メモリの回路と応用に関する研究」

強誘電体を用いた新しいCMOS機能メモリの回路と応用に関する研究について述べる。高密度機能メモリを実現するためChain FRAM (CFRAM) の概念を取り入れた機能メモリを考案し、その特徴である並列処理機能を有効に生かすため検索アルゴリズムを考察し、それに適した内部演算回路を合成した。

21世紀に向けたウェアラブル・コンピューティング社会の実現のため次世代不揮発性半導体メモリ技術の研究が重要な課題であり、強誘電体メモリ (FeRAM) が注目を集めている。FeRAMは強誘電薄膜をキャパシタとしてメモリセルに用いることで電源を切っても記憶データが失われないという不揮発性とメモリの読み出し/書き込み動作をほぼ等しい時間内で行なえるというランダムアクセス性を兼ね備えている。機能メモリはノイマン型コンピュータと異なり超並列データ処理が可能となり、従来型コンピュータのボトルネックと言われた配線部でのデータフローレイトの限界を打破する技術として注目されている。ワードパラレルに演算が実行されるため並列処理が可能になる。したがって、データフロー型M/Cとして機能するので、データ量が大きく比較的簡単な演算処理を必要とする用途に向くといわれている。従来のFeRAMセルはDRAMと同じセル構成をとっているためセル面積をこれ以上縮小することができない。この問題を解決するためChain FRAMが提案された。Chain FRAMは一つのメモリセルの中でパストランジスタと強誘電体キャパシタとが並列接続されている。このメモリセルがいくつも直列に接続されて一つのセルブロックを作る。CFRAMはセルの信号を読み出すために差動型SAを用いているので、リファレンス信号をダミーセルによって作っている。従ってDRAMと同様なビットライン・アーキテクチャが必要になる。

一方、検索（サーチ）や整列（ソート）への応用を考え、各ブロックの出力が同時に要求されるのでメモリセルの出力信号はビットシリアル・ワードパラレルに内部配線を使って取り出し、リファレンス信号はオープン・ビットライン・アーキテクチャの考えを用い、チェーンセルブロックごとに設けられたダミーセルブロックから得る。検索（サーチ）はコンピュータ内に置かれたデータ構造の中から特定のデータを見つけ出す問題である。この問題をコンピュータに解かすためには比較器（マッチング回路）が必要である。機能メモリを使ったワードパラレル・ビットシリアルな並列処理では各桁におけるマッチング判定を全てのデータについて行うことになるので、各データ及び参照データのそれぞれ同じ位のもの同士を比較すればよい。従って、排他的論理和（XOR）の否定、すなわち、XNORを並列に配置した回路があれば良い。検索ビット各桁、位の情報はシリアルに入力されるので全部の桁で比較器の出力が“1”であることを検知するためには前段の出力が“1”であることと新しい桁の出力とが“1”であることを繰り返し行うことが必要になる。これは2入力ANDのカスケード接続CMOS dynamic logic (Domino) 回路を用いることで達成できる。

ここでは目標とするデータが見つかるまで順に比較していくシーケンシャル・サーチ（順検索）との比較を紹介する。単純のため、全てのデータについて全ての位（桁）を調べるという条件の下で検討した。全てのデータについてビット・パラレルに調べるときCAM (Content Addressable Memory) を用いて検索した場合の演算回数はサンプル数を $S = 2^n$ とすれば $S = 2^n$ 回となる。一方機能メモリを用いてビットシリアルに調べる場合、 $1/2V_{dd}$ スキームおよび階層ビット線分割方式を用いれば、すなわち $S < 4M$ 以下であれば演算回数は $n$ 回である。 $S$ が約100万個、 $n = 20$ として計算すると改善比は約 $5 \times 10^4$ となる。

本研究ではシーケンシャル・サーチについて従来方式と演算回数の減少比を理論的に考察、比較し良好な結果を得た。また、整列（ソート）等についても専用のアルゴリズムを適用することで同様な成果が期待できることも分かっている。従ってビットシリアル・ワードパラレル型強誘電体機能メモリの新しい応用分野として現在成長の著しいインターネット関連情報処理分野が大変有望であることが明らかになった。

#### 参考文献

野澤、電子情報通信学会、信学技報Vol. 105 No. 492 pp. 53-58 2005

## エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（吉川研究室）

[http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index\\_j.html](http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/beam/index_j.html)

## 「相対論的電子ビームを用いた新量子放射エネルギーの発生」

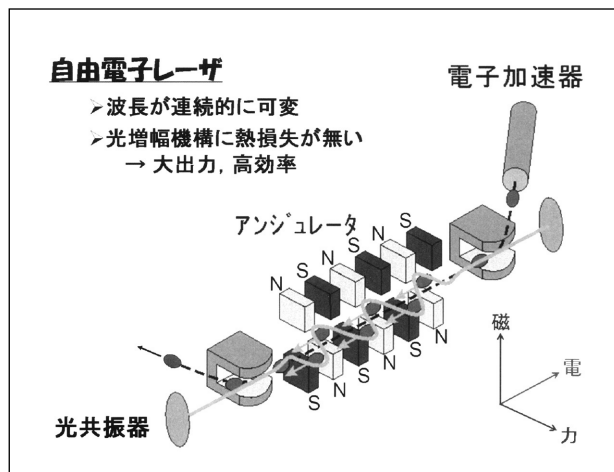
本研究室では、荷電粒子ビームと電磁界との相互作用を高度・高精緻に制御することにより21世紀の人類に計り知れない恩恵をもたらす先進科学技術の開発を目指して、爆薬等の探知から医療用まで多様な応用が期待される超小型の放電型核融合中性子・陽子源、荷電粒子ビームエネルギーの電磁界を介した高効率直接発電や、ここで紹介する高輝度・高エネルギー電子ビームの生成とそれを用いた新量子放射エネルギーの発生などの研究を行っています。

高エネルギー電子ビームを用いることによって、従来のレーザー等にはない機能、波長領域、強度の新しい放射源が実現します。例えば、SPRING-8に代表されるシンクロトロン放射は既に盛んに利用されています。レーザー逆コンプトン散乱による準単色ガンマ線源や、広い波長領域でのコヒーレント光の発生が可能な自由電子レーザー（Free

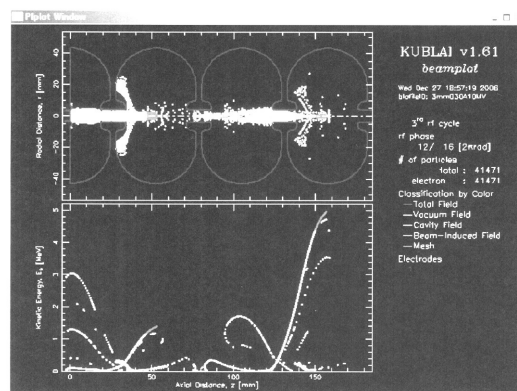
Electron Laser: FEL）も世界中で研究開発が行われています。従来のレーザーは原子や分子に束縛された電子が高エネルギー準位から低い準位に遷移するときに発生しますが、FELは言わば準位を人工的に作り出すことによって得られ、様々な新たな要求に応える柔軟性をえています。

右上図のように、FELは電子加速器、アンジュレータ、光共振器から成ります。高エネルギー電子は、アンジュレータの周期的交代静磁場の中を蛇行し、その周期（数cm）に応じた波長の電磁波を放出しますが、このとき相対論的ドップラーシフトの効果により、前方に放出される電磁波（自発放射光）の波長は電子エネルギーに応じてテラヘルツから可視、X線領域にも達します。さらに、蛇行する電子は横方向の速度成分を持ちますので、自発放射光の横方向電界と相互作用してエネルギーの授受が起り、条件が整えば光の増幅が起こります。また、光の磁界とそれに直角な横方向の速度成分によって電子には進行方向にも力が働き、電子は光のある位相に集団化されます。その位相が光の増幅条件下にあれば光はコヒーレントなレーザーになります。

FELは電子の運動エネルギーをより付加価値の高い量子放射エネルギーに無損失で変換したものとも言え、右上図中に示したような従来のレーザーにない特長があります。私たちが宇治キャンパスで開発しているFELでは、先日、平成18年12月11日に約40 MeVの電子ビームを用いて自発放射光の発生に成功しました。当初は波長4～13  $\mu\text{m}$ 連続可変で、直線偏光の赤外FEL発振を目指しています。さらに、偏光可変FEL、準単色ガンマ線や単色テラヘルツ光の発生も将来計画しています。これらの量子放射源の性能の鍵を握っている高輝度電子ビーム生成の研究、特にその数値シミュレーション研究においては、本研究室は世界をリードしています。国内シミュレーションコードのベンチマークを高輝度光科学研究センター/Spring-8と共催していますので、そのホームページ<http://acc-web.spring8.or.jp/~workshop/e-gun/>も参照してください。



自由電子レーザー（FEL）の概念図と特長



本研究室で開発した有限要素法粒子シミュレーションコード



## エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（水内研）

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/plasmak/index.html>

### 核融合プラズマにおける波動電流駆動・加熱法の開発

京都大学で独自に創案されたヘリオトロン磁場配位は、ヘリオトロンEに代表される歴代のヘリオトロン装置により、高温プラズマ閉じ込め概念としての優位性が実証されてきました。これらの成果を発展させ、更なるプラズマ閉じ込め磁場配位最適化を目指して、私たちはヘリカル軸ヘリオトロン配位を持つプラズマ実験装置「ヘリオトロンJ」において、新しい磁場配位パラメタ領域におけるプラズマ閉じ込め特性の理解に資するため精力的に実験研究を進めています。ヘリオトロンJでは、電子サイクロトロン共鳴加熱システム（ECH）を用いたプラズマ生成・加熱を行っており、周波数70GHz、最大入射パワー400kW、最大パルス幅0.2 secの高パワーミリ波を入射することにより、国際実験則ISS95の予測値の最大2倍となるプラズマエネルギー閉じ込め時間が得られています。また、閉じ込め状態の自発的な遷移現象（Hモード遷移）を発見し、その発現機構及びISS95エネルギー閉じ込め比例則との比較に関する研究が進展しています。HモードECHプラズマのエネルギー閉じ込め時間は遷移前と比較し約50%の向上が見出されており、ヘリオトロンJ装置の閉じ込めの良さを実証しました。

トロイダルプラズマにおいて、プラズマ中を流れるトロイダル電流の制御は高性能プラズマの実現や定常プラズマ維持に向けての重要な課題の一つです。ヘリカル系では閉じ込め磁場は外部コイルによって形成できることから、オーミック電流のような誘導電流をプラズマ平衡のために必要としません。しかしながら、トカマクと同様に有限のプラズマ圧力がブートストラップ電流を駆動し回転変換分布を変えることで、プラズマの平衡・安定性に影響を及ぼすことが指摘されています。電子サイクロトロン電流駆動（Electron Cyclotron Current Drive, ECCD）はブートストラップ電流を抑制し回転変換分布に危険な有理面を生じさせない手法として、その利用が提案され、現在、ヘリオトロンJにおいて実験的な検証が行われようとしています。また、オーミック電流を必要としないヘリカル系でのECCD研究により、トロイダルプラズマにおけるECCD物理がより深く理解できるものと期待できます。電子サイクロトロン波は磁力線に垂直方向に電子を加速しますので、磁力線方向には直接運動量を与えませんが、速度空間における非一様性を生じさせ、結果としてトロイダル電流が流れるという興味深い物理機構から電流駆動されます。一方、計測の観点からは、ヘリカル系装置はオーミック電流を必要としないためEC電流の精度良い測定が可能であるという長所を有しています。トロイダル電場による非線形効果がないこと、また、オーミック電流が存在しないことにより従来のロゴスキーコイルを用いて1kA以下という高精度で非誘導電流の計測が可能です。最近、ヘリオトロンJ、TJ-II（CIEMAT、スペイン）、CHS（NIFS、日本）のヘリカル系装置においてECCDに関する国際共同実験が進められており、共通する電流駆動物理の抽出が期待できます。これまでの共同実験では中型ヘリカル装置におけるECCD特性が調べられ、電流駆動効率が同程度であること、入射角、磁場配位などによって制御可能であることを示しました。また、W7-X（MPI、ドイツ）との理論共同研究では、図1に示すようなレイトレーシング計算を用いてECパワー吸収分布、及び、ECCDの理論解析を進めています。

波動電流駆動・加熱法の開発に関し、水内研では新しいプラズマ波動加熱の開発も進めています。正常波・異常波と呼ばれる電磁波伝播ではカットオフと呼ばれる密度上限が存在し、高密度領域における電子加熱・電流駆動が困難となります。この問題を解決するため、静電波の一種である電子バーンスタイン波（EBW）を用い、電子密度に依らない新しい加熱・電流駆動法を開発中です。EBWは、（1）密度上限が存在しない、（2）低電子温度においてもパワー吸収率が極めて高い、という長所を有しており、また、低温高密度プラズマの生成など、プロセスプラズマにも応用が期待されています。

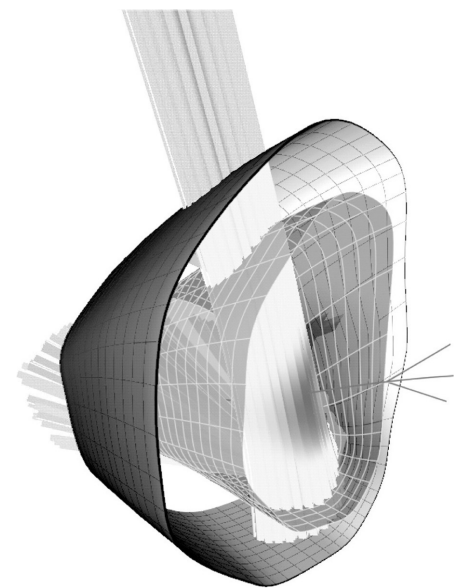


図1. レイトレーシング計算コード TRAVISによる電子サイクロトロン波の伝搬・吸収解析

## 電波応用工学研究部門 レーダーリモートセンシング工学分野（深尾研究室）

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/labs/fukao-lab/>

### 「大気レーダーによる台風の観測」

当研究室は、先端的大気レーダー・リモートセンシング・テクノロジーを開発し、大気圏の未知・未解決の諸現象の解明に挑んでいる。ここでは、その一例として大気レーダーによる台風観測について紹介する。

風速の計測はかつて地上に設置した風速計や気象気球の放球により行われていたが、高層の風速を時間・高度的に連続に測ることは不可能であった。一方、大気レーダーは大気中に普遍的に存在する大気乱流からの散乱を利用することで、天候に関係なく高層大気の鉛直流を含む風速3成分を連続計測できる。我々はMUレーダーで培った技術を基に、気象観測に重要な高度5km程度までの下部対流圏の全高度域をカバーする小型の大気レーダー（下部対流圏レーダー；図1）の開発に成功した。

気象庁は、平成12年度に局地天気予報の精度向上を図るために全国に大気レーダーネットワークを展開し、現業の天気予報への活用を開始した。WINDASと呼ばれるこのネットワークを構成する大気レーダーとして下部対流圏レーダーが採用され、現在31台から成るレーダーネットワークから得られるデータが気象予報モデルの初期値として取り込まれ、日々の天気予報業務に活用されている。この結果、従来予報が困難であった集中豪雨などの局地現象に対する予報精度が著しく向上している。

平成15年夏に発生した台風10号が、WINDASを構成する鹿児島県奄美大島の下部対流圏レーダーの直上を通過し、初めて最盛期の台風の目の内部の観測に成功した。観測データを詳細に解析し、この台風は目の直径が約70kmで、その周囲を高さ約10km、厚さ数10kmの壁雲が取り囲んでおり、目の中に直径数km～数10kmに渡る上昇流と下降流が混在していることを見出した(図2, 3)。従来、ほとんど雲が存在しない台風の目の内部は、下降流であると考えられていたが、大気レーダーによる観測から、上昇流が存在するという新たな事実が発見された。この成果は台風の進路予想の精度向上などに貢献すると期待されている。



図1. 下部対流圏レーダー

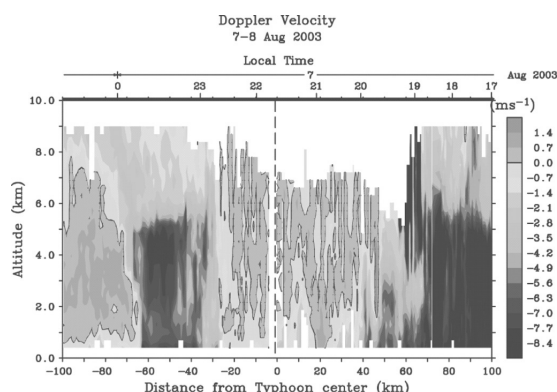


図2. 奄美大島の下部対流圏レーダーで観測された台風0310号の鉛直流の台風中心からの距離・高度変化。正が上昇流、負が下降流を表す。距離30km以遠の大きな下降流は雨粒の落下速度に対応する。

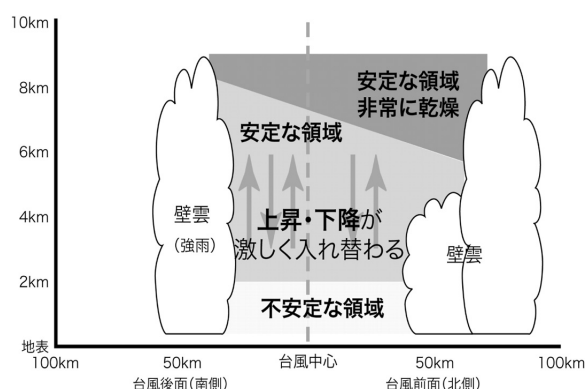


図3. 観測された台風の構造の模式図。